



Timo Melkas



Mikko Vastaranta



Markus Holopainen



Jani Kivilähde



Mikko Merimaa

Timo Melkas, Mikko Vastaranta, Markus Holopainen,
Jani Kivilähde ja Mikko Merimaa

Puun läpimitan mittauksen tarkkuus ja tehokkuus laser- ja digitaalikuvatekniikkaan perustuen

Melkas, T., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kivilähde, J. & Merimaa, M. 2009. Puun läpimitan mittauksen tarkkuus ja tehokkuus laser- ja digitaalikuvatekniikkaan perustuen. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 325–340.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää laser- ja digitaalikuvatekniikkaan perustuvan mittalaitteen (laserkamera) mittaustarkkuus- ja tehokkuus sekä tekninen toimivuus ja soveltamisedellytykset metsäolosuhteissa. Laserkamera koostuu Canonin EOS 400D -digitaalisesta järjestelmäkamerasta, johon on liitetty Mitsubishin MLI01J27 -laserdiodin pohjalle rakennettu viivalasergeneraattori. Läpimitan mittaus perustuu runkoon heijastettavaan laserviivaan ja pisteeseen, joiden avulla digitaalikuvasta voidaan mitata puun läpimita. Tutkimusaineisto kerättiin talvella 2007–2008 kolmelta toiselta ympyräkoealalta ($r=7,98-10$ m) ja se käsitti 728 läpimittahavaintoa ($d_{1,3}$) 265 puusta. Läpimitan mittauksen keskivirhe koko aineistossa oli 6 mm, kun läpimita mitattiin kuvatulkintaohjelmalla puoliautomaattisesti. Puulajeittain paras tarkkuus saavutettiin kuusella 5,0 mm (4,4 %), sitten koivulla 6,4 mm (3,3 %) ja männyllä 7,6 mm (7,6 %). Laserkamera antoi keskimäärin lievän yliarvion (2,3 %) rinnankorkeusläpimitasta. Läpimitan mittaus puoliautomaattista kuvatulkintaa käyttäen onnistui 80 %:lle havainnoista. Täysin automaattista kuvatulkintaa käyttäen läpimitan mittauksen keskivirheeksi saatiin 12,7 mm:ä. Mittaus laserkameralla on nopeaa (10 s / puu) ja läpimitan mittauksen tarkkuus kilpailukykyinen perinteisten mittausten menetelmien kanssa. Suurimmat virhelähteet aiheutuvat oksista (näkyvyys), jolloin laserpiste ei osu runkoon ja mittaus epäonnistuu. Laserkamera on varsin lupaava mittalaite rungon läpimitan mittaamiseen. Liittämällä laitteeseen kulma-anturi, laseretäisyysmittari, elektroninen kompassi sekä GPS-vastaanotin mahdollistaa se puun pituuden, sijainnin sekä laatutunnusten mittaamisen koealalla.

Asiasanat: metsänarviointi, puun läpimitan mittaus, viivalaser, kuvankäsittely, digitaalikamera
Yhteystiedot: *Melkas*, Metsäteho, PL 101, 00171 Helsinki; *Holopainen* ja *Vastaranta*, Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto.; *Kivilähde*, jani.kivilahde@iki.fi; *Merimaa*, Mittatekniikan keskus, PL 9, Tekniikantie 1, 02151 Espoo
Sähköposti timo.melkas@metsateho.fi
Hyväksytty 25.6.2009
Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff094325.pdf>

I Johdanto

Metsävarojen inventoinnissa, metsäsuunnittelussa ja puutavaran mittauksessa yksi tärkeimmistä mitattavista tunnuksista on puun läpimitta. Rinnankorkeusläpimitta on selittäväenä muuttujana useimmissa yksittäistä puuta sekä metsikköä kuvaavista malleista. Osa metsän käsittelyä koskevista päätöksistä tehdään joko suoraan tai välillisesti metsiköstä mitattavan tai mitattavien läpimittojen perusteella. Perinteisesti läpimitta on mitattu läpimittasaksilla, elektronisilla mittasaksilla, tallmetrillä tai kaulaimella. Edellä mainittujen mittalaitteiden käyttö on edellyttänyt käyntiä mitattavan puun luona.

Metsävarojen inventoinnissa ja metsäsuunnittelussa ollaan siirtymässä tulevaisuudessa yhä enemmän kaukokartoituspohjaisiin, laserkeilaukseen (airborne laser scanning, ALS) ja digitaaliseen fotogrammetriaan perustuviin menetelmiin. Aluepohjaisten puustotunnusten mallittamisessa (mm. Naeset 1997a, 1997b, 2002, 2004, Hyypä ym. 2006, 2008) sekä yksittäisten puiden tunnistamisessa (mm. Hyypä ja Hyypä 1999, Hyypä ja Inkinen 1999, Holmgren 2003, Korpela 2004, Korpela ym. 2007a, Hyypä ym. 2005, 2006, 2008, Maltamo ym. 2004) yksityiskohtaisella kaukokartoituksella päästään nykyisin vähintään samaan tarkkuustasoon kuin perinteisillä operatiiviseen metsäsuunnitteluun liittyvillä maastomittausmenetelmillä.

Kaukokartoitusmenetelmät vaativat tuekseen maastossa tehtäviä koealamittauksia metsikkötunnusten mallintamiseen ja tulosten kalibrointiin. Mittaukset on pystyttävä yhä tarkemmin sitomaan paikkaan, koska uudet menetelmät mahdollistavat puukohtaisen tiedon keräämisen koeala- tai kuviokohtaisen tiedon sijaan. Maastossa tehtävät mittaukset perinteisin menetelmin ovat kalliita ja tästä syystä on lähdetty kehittämään tarkempia, tehokkaampia ja yksinkertaisempia menetelmiä koealan puuston mittaamiseen, tavoitteena puuta koskevan mittaus eli metsän sisältä tapahtuva kaukokartoitus.

Myös puutavaran mittauksessa raaka-aineen dimensioiden ja laadun määrittäminen on tärkeää, koska se luo perustan puukaupalle. Leimikon ennakkomittauksen tavoitteena on saada ennakkotietoa hakattavan leimikon puutavaralajijakaumasta ja hakkuukertymästä ja sitä kautta parantaa leimikosta saa-

tavien runkojen apteerausta ja jatkojalostusta. Mitä parempi ennakkotieto (esim. läpimitta- ja pituusjakauma) hakattavasta leimikosta on käytettävissä, sitä paremmin voidaan ottaa laatutekijät huomioon ja valita jäljelle jäävät puut sekä apteerata leimikosta saatavat rungot.

Laserteknologiaan perustuvat menetelmät ovat luoneet uusia mahdollisuuksia pystyvuuston mittaukseen, erityisesti puun laatutunnusten määrittämiseen. Maalasereiden (2D- ja 3D-laser) avulla saadaan yksityiskohtainen kuva koealan puustosta (Jutila ym. 2007, Henning ja Radtke 2006, Watt ja Donoghue 2005, Hopkinson ym. 2004). Ongelmana tällä erää on lähinnä aineistojen vaatima työläs ja aikaa vievä jälkikäsitely, koska ei ole olemassa valmiita algoritmeja tai ohjelmistoja, joiden avulla voidaan tuottaa halutut koealan puustoa ja sen ominaisuuksia kuvaavat tunnuksat metsän sisältä tapahtuvan laserkeilauksen (TLS) tuottamasta pisteparvesta (Watt ja Donoghue 2005). Maalasereita on käytetty paljon rakennetun ympäristön mallintamiseen, mutta metsäsovelluksiin liittyvät maalasertutkimukset ovat toistaiseksi keskittyneet lähinnä yksittäisille koealoille, yksittäisten puutunnusten estimointiin, ei niinkään suurten metsäalueiden käytännön inventointimenetelmien luomiseen ja kehittämiseen.

Kuviotasolla maalasereita on hyödynnetty mm. Forestrix hankkeessa, jossa on kehitetty menetelmiä maalaserin liittämiseksi osaksi hakkuukonemittaus- ta, jolloin keilaavan hakkuukoneeseen asennettavan laserin avulla voitaisiin tuottaa puukartta (Forsman ja Halme 2005, Miettinen ym. 2007), mitata runkolukusarja (Jutila ym. 2007) sekä tehdä ehdotus harvennushakkuussa poistettavista puista puuston läpimittajakauman ja tilajakauman perusteella.

Korpela ym. (2007b) ovat kehittäneet menetelmän metsän kartoittamiseksi fotogrammetrian ja maastogeodesian keinoin. Menetelmässä metsikköön luodaan tukipisteiden verkosto tunnistamalla ilmakuvilta puiden latvuksia. Mittaamalla etäisyyksiä ja suuntia näihin sijainniltaan tunnettuhin puihin voidaan menetelmässä paikantaa puut, jotka eivät näy ilmakuvilta. Puukartta luodaan tasoittamalla puiden sijainnit pienimmän nelisumman periaatteella ja puustotunnukset johdetaan mallien avulla.

Lasertekniikkaan perustuvia mittalaitteita puun läpimitan mittaamiseen on kehitetty ja testattu mm. Yhdysvalloissa (Carr 1992, 1996, Williams

ym. 1999), mutta laitteet eivät ole olleet tarpeeksi helppokäyttöisiä, tehokkaita eikä laitteiden hinta ole ollut kilpailukykyinen perinteisten metsäsuunnitteluun tarkoitettujen mittalaitteisiin verrattuna. Barr & Strouidin sekä Criterionin valmistamilla laserdendrometreillä yläläpimitan keskihajonnaksi on saatu 8.8 mm ja 14.3 mm (Skovgaard ym. 1998, Parker ja Maney 1999). Myöskään videokuvaan ja lasertekniikkaan perustuvilla mittalaitteilla ei ole päästy riittävän luotettaviin tuloksiin läpimitan mittauksessa, vaan mittaustarkkuus on jäänyt 19,6–24,6 mm:iin (Clark ym. 2001).

Suomessa laserteknologian hyödyntämistä maastomittauksissa on testattu mm. laserrelaskoopin kehityshankkeessa, jossa tavoitteena oli kehittää mittalaite, jolla koealan puusto voidaan mitata käymättä puiden luona. Mittalaite koostuu säädettävästä relaskoopin hahlostasta, elektronisesta kompassista, kulma-anturista ja etäisyysmittarista, tiedonkeruuyksiköstä sekä GPS -vastaanottimesta (Kalliovirta ym. 2005). Laitteella voidaan mitata koealan runkolukusarja, puiden pituudet sekä sijainnit (suunta ja etäisyys) koealan keskipisteestä puita koskematta. Läpimitan mittaus perustui relaskoopin periaatteen, jossa relaskoopin hahlo säädettiin vastaamaan puun ääri viivoja, jolloin läpimita saatiin verrannon avulla, kun tiedetään etäisyys puuhun sekä relaskoopin hahlon leveys ja varren pituus.

Parhaimmillaan laserrelaskoopilla saavutettiin läpimitan mittauksessa 8,2 mm:n keskihajonta (Kalliovirta ym. 2005). Mittaustuloksen todettiin olevan riippuvainen mittaajasta ja mittaajan kokemuksesta (Laasasenaho ym. 2002). Vertailtaessa eri mittaajien saamia tuloksia vaihteli keskihajonta läpimitan mittauksessa 8 mm:stä 16 mm:iin. Läpimitan mittauksessa harha oli lievästi positiivinen. Puun pituuden (s.d.=49 cm) ja sijainnin (s.d.=32 cm) määrittäminen onnistui laserrelaskoopilla hyvin. Laserrelaskoopin mittaustehokkuus oli varsin hyvä verrattuna perinteisiin mittausten menetelmiin ottaen huomioon, että mitattavalta koealalta saatiin mitattua puuston runkolukusarja sekä puiden sijainnit samanaikaisesti. Yhden relaskoopikoealan (q=2) mittaamiseen kului keskimäärin 15,5 minuuttia yhdeltä mittaajalta.

Seuraava askel mittalaitteen kehittämisessä oli pyrkimys poistaa mittaajasta aiheutuva virhe mitaustuloksesta. Ojanen (2005) kehitti laservalaisuun,

digitaalikameraan ja kuvankäsittelyyn perustuvan menetelmän, jolla puun läpimita voitiin määrittää ± 5 mm:n mittausepävarmuudella. Laite suunniteltiin toimivaksi 1–15 metrin säteisen ympyräkoelan mittaamiseen. Nykyinen laserkamera on ensimmäinen prototyyppi, jossa on hyödynnetty Ojasen (2005) menetelmää.

Varjo ym. (2006) ovat tutkineet digitaalikameran (Canon PowerShot) soveltuvuutta puun läpimittojen mittaamiseen rungon eri korkeuksilta. Tutkimuksessa kehitettiin menetelmä, jossa laseretäisyysmittarin ja digitaalikameralla otetun kuvan perusteella voitiin määrittää läpimita halutulle puun rungon korkeudelle. Mittakaava kuvalle saatiin puun kylkeen vietävän apumitan (skaalatikku) avulla. Kuvatulkintaa ohjattiin rungon muotoa kuvaavan runkokäyrämallin avulla (Lappi 1986, Juujärvi ym. 1998). Läpimitan mittauksen tarkkuus (RMSE) oli 7,0–9,4 mm ja harha lievästi negatiivinen 0,6–2,8 mm, läpimitan mittauskorkeuden vaihdella 2,5–6,5 metrin välillä (Varjo ym. 2006)

Suomela (2005), Österberg ym. (2006) ja Kosonen (2007) ovat puolestaan kehittäneet menetelmiä digitaalikuvioiden hyödyntämiseen automaattisessa puulajitunnistuksessa. Menetelmässä puulajitunnistus perustuu hahmontunnistuksen sekä eri väri- ja tekstuuripiirteiden laskentaan digitaalikuville tavoitteena eri puulajien erottaminen ja tunnistaminen. Kososen (2007) mukaan männyn, kuusen, koivun ja haavan automaattinen puulajitunnistus onnistuu parhaimmillaan 90 %:lle ja keskimäärin 80 %:lle havainnoista. Jotta automaattista puulajitunnistusta voitaisiin käyttää käytännön sovelluksissa, tulisi puulajitunnistuksen tapahtua lähes 100 % varmuudella. Lähtökohta puulajitunnistuksen osalta tässä tutkimuksessa on, että mittaaja määrittää puulajin tarkastaessaan läpimitan mittauksen onnistumisen.

2 Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää laser- ja digitaalikuviotekniikkaan perustuvan mittalaitteen läpimitan mittaustarkkuus- ja tehokkuus sekä tekninen toimivuus ja soveltamisedellytykset metsäolosuhteissa. Testattava mittalaite ja ohjelmisto on kehitetty Mittatekniikan keskuksessa, osana Mittatekniikan

keskuksen, Teknillisen korkeakoulun, Helsingin yliopiston, Masser Oy:n ja Metsätalouden kehittämisskeskus Tapion puuston mittauksen yhteishanketta, jonka koordinoinnista on vastannut Metsäteho Oy. Tavoitteena on ollut kehittää pystypuuston mittaukseen soveltuva mittalaite (prototyypä), jolla koealan puusto (runkolukusarja, puiden pituus, sijainti ja laatutunnukset) voidaan mitata koealan keskipisteestä käymättä puiden luona. Keskeinen tavoite on ollut läpimitan mittaustarkkuuden parantaminen, mittaajasta aiheutuvan virheen eliminoiminen sekä laserteknologian liittäminen digitaalikameraan. Läpimitan mittauksen periaate uudessa prototyypissä perustuu runkoon heijastettavaan laserviivan ja pisteen suhteeseen, jonka avulla digitaalikuva voidaan mitata puun läpimitalla.

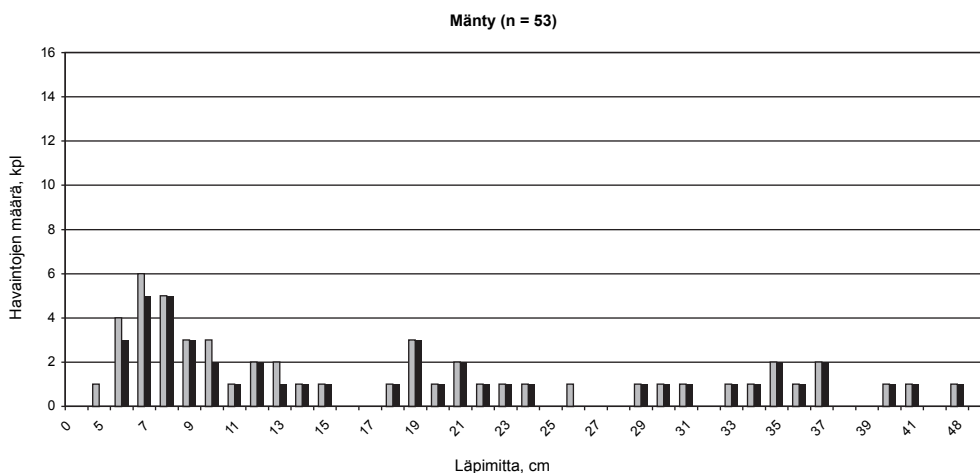
3 Aineisto

Tutkimusaineisto kerättiin vuodenvaihteessa 2007–2008 kahdelta eri tutkimusalueelta, Espoon Nuuksiosta (10) ja Espoonlahdelta (3), yhteensä kolmetoista ympyräkoealalta. Nuuksiosta koealan säde oli 7,98 m ja Espoonlahdella 10,0 m. Mitattujen koealojen kehitysluokka vaihteli nuoresta kasvatusmetsästä uudistuskypsään ja kasvupaikka lehtomaisesta kankaasta kuivaan kankaaseen. Nuuksiosta koealat oli mitattu perinteisin menetelmin kesällä 2007. Koealoilta oli määritetty yleistiedot, kuten kasvupaikka ja kehitysluokka, puiden sijainnit mitanauhalla ja bussolia apuna käyttäen sekä puulaji ja rinnankorkeusläpimita. Koealojen valinta tehtiin kesän mittausten perusteella. Koealat pyrittiin si-

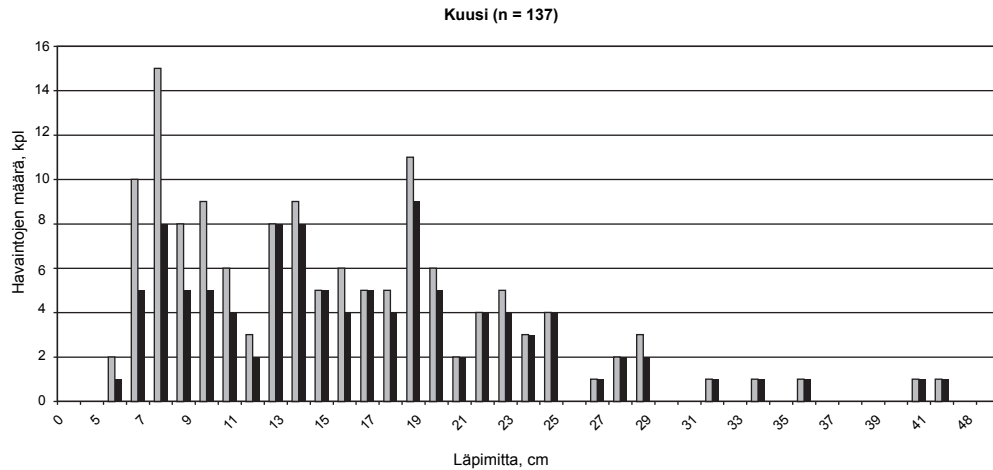
Taulukko 1. Aineiston kuvaus. Läpimitahavaintojen lukumäärä (n_1), koepuiden lukumäärä (n_2) sekä läpimitahavaintojen minimi- ja maksimiarvot, keskiarvo sekä hajonta puulajeittain.

	n_1	n_2	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Hajonta
Mänty	153	53	4,4	46,5	15,7	11,7
Kuusi	386	137	5,2	40,9	14,8	7,8
Koivu	108	42	5,0	40,4	22,8	7,7
Muu lehtipuu ^{a)}	81	33	4,7	47,8	20,9	11,7
Koko aineisto	728	265	4,4	47,8	16,9	9,7

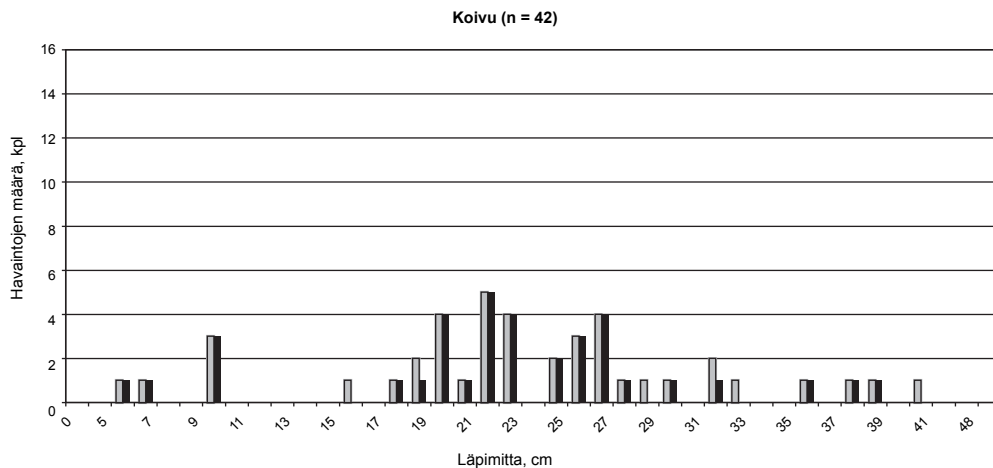
^{a)} Haapa (n=51), pihlaja (n=17), leppä (n=13)



Kuva 1. Mäntykoepuiden runkolukusarja. Vaaleampi palkki kuvaa kuvattujen mäntykoepuiden määrää ja tummempi palkki mäntykoepuiden määrää, joille kyseisessä läpimitaluokassa oli mahdollista määrittää laserkameralla rinnankorkeusläpimita.



Kuva 2. Kuusikoepuiden runkolukusarja. Vaaleampi palkki kuvaa kuvattujen kuusikoepuiden määrää ja tummempi palkki kuusikoepuiden määrää, joille kyseisessä läpimittaluokassa oli mahdollista määrittää laserkameralla rinnankorkeusläpimitta.



Kuva 3. Koivukoepuiden runkolukusarja. Vaaleampi palkki kuvaa kuvattujen koivukoepuiden määrää ja tummempi palkki koivukoepuiden määrää, joille kyseisessä läpimittaluokassa oli mahdollista määrittää laserkameralla rinnankorkeusläpimitta.

joittamaan puustoltaan, kehitysluokaltaan ja metsätyypiltään mahdollisimman erilaisiin metsiköihin. Kesällä mitattuja rinnankorkeusläpimittoja ei käytetty laitteen testauksessa.

Mittalaitteen testausta ja puiden tunnistamista varten koalojen puut numeroitiin kiinnittämällä numerolappu puun kylkeen numerolapun alareuna rinnankorkeuden tasalle. Läpimitta mitattiin mittasaksilla ja laserkameralla millimetrin tarkkuudella

numerolapun alapuolelta. Puille määritettiin puulaaji ja rinnankorkeusläpimitta kohtisuoraan koalan keskipistettä kohden. Tutkimusaineisto käsitti kaiken kaikkiaan 728 läpimittahavaintoa 265 puusta (taulukko 1).

Läpimittahavaintojen jakautuminen eri läpimittaluokkiin puulajeittain on esitetty kuvissa 1–3. Kuvissa läpimitat on pyöristetty läpimittaluokkiin käyttäen 1 cm:n tasaavaa luokitusta.

Maastossa puut kuvattiin laserkameralla koealan keskipisteestä, jonka jälkeen kuvista tulkittiin mitattujen puiden läpimitat joko täysin automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Jos puu ei näkynyt koealan keskipisteeseen, siirryttiin muutamia askelia niin, että puu saatiin näkyviin. Pääosa laserkameralla otetuista kuvista tulkittiin jälkikäteen läpimitan mittaukseen kehitetyllä kuvatulkintaohjelmalla (PUMI). Toistomittauksia tehtiin neljännessä koealasta alkaen siten, että kolmelta seuraavalta koealalta mitattiin läpimittahavainnot jokaisesta puusta kaksi ja lopulta koealoilta (7 kpl) neljä. Mittausten määrää kasvatettiin sitä mukaa, kun saatiin lisätietoa laitteen toiminnasta.

Koealan mittaukseen kulunut aika selvitettiin jälkikäteen minuutin tarkkuudella tallentuneiden kuvatiedostojen aikaleimojen perusteella. Koealamittaus käsitti läpimittojen mittaamisen laserkameralla. Yhdellä mittauskerralla kustakin puusta otettiin yhdestä kahteen havaintoa. Yhdestä puusta mitattujen havaintojen määrä vaihteli yhdestä neljään havaintoon.

4 Menetelmä

4.1 Laserkamera

Tutkimuksessa testattava mittalaite, laserkamera, koostuu Canonin EOS 400D -digitaalisesta järjestelmäkamerasta, johon on liitetty Mitsubishin ML101J27 -laserdiodin pohjalta rakennettu viivalasergeneraattori. Kameran objektiivina käytettiin Canonin EF 70–300mm f/4,5–5,6 DO IS USM -mallin objektiivia. Kamerakennon resoluutio on 10 megapikseliä. Kameran ohjelmakehityspaketin (Software Development Kit) avulla luotiin oma ohjelmisto, jolla voitiin muuttaa kameran asetuksia sekä siirtää kuvatiedostoja tietokoneelle. Kuvatulkinta suoritettiin sitä varten kehitetyllä kuvantulkintaohjelmistolla (PUMI-ohjelma), joko maastossa reaaliaikaisesti tai jälkikäteen.

Laserkamera toimii yhdellä akulla (Li-Pol), joka koteloitettiin kameran alle. Laserviivageneraattorin ohjaus toteutettiin siten, että kameran tarkentaessa (laukaisimen puoliasento) laserviivageneraattori kytkeytyy päälle. Laserviivageneraattorissa käytettiin



Kuva 4. Laserkamera koostuu Canonin EOS 400D -digitaalisesta järjestelmäkamerasta, viivalasergeneraattorista ja akkukotelosta. Laitteessa on myös paikka kulma-anturi-moduulille (Kivilähde 2008).

15 asteen aukeamiskulmaa, jolloin 5, 10 ja 15 metrin etäisyyksiltä laserviivan leveydeksi saatiin noin 1,3, 2,6 ja 3,9 m. Maksimi mittausetäisyys minimipolttovälillä on noin 10,5 m ja maksimipolttovälillä 22,5 m. Laserkameraan voidaan liittää myös kulma-anturi (Masser Oy), joka mahdollista läpimitan mittaamisen rungon eri korkeuksilta. Laserkameran paino on noin 1,5 kg, josta kamera (0,51 kg) ja objektiivi (0,72 kg) muodostavat pääosan. Laserkameran (prototyypin) hinta on 2 600–3 000 €. Tulkinnassa käytetyn mittaustietokoneen hinta on noin 1 000 €. (Kivilähde 2008).

4.2 PUMI-ohjelma

PUMI-ohjelma kehitettiin digitaalisten kuvien visuaaliseen kuvatulkintaan ja mittaustulosten validointiin (Kivilähde 2008). Ohjelmalla voidaan rungosta otettu kuva avata tietokoneen näytölle ja tarkastaa mittaustulos visuaalisesti. Mikäli rungon reunaa kuvaavat reunamerkit eivät ole oikeassa kohdassa, voidaan ne siirtää ohjelman avulla oikeaan kohtaan,



Kuva 5. Läpimitan mittaamisen periaate laserkameralla.

ja näin saadaan virheellisesti mitattu läpimitta korjattua. Ohjelmalla voidaan myös säätää kameran asetuksia.

4.3 Läpimitan mittauksen periaate

Läpimitan mittauksen periaate uudessa laserkameran prototyypissä perustuu runkoon heijastettavaan laserviivaan ja pisteeseen. Heijastettu laserviiva katkeaa rungon ääriiviivojen kohdalla, jolloin rungon läpimitta voidaan laskea runkoon heijastuneen laserviivan pituuden avulla. Laserviivan pituus kuvalla saadaan viivan pituutta vastaavana kuvapikselien määränä. Tämä muunnetaan mittakaavan avulla rungon läpimitaksi. Mittakaava kuvalle saadaan laserviivan ja laserpisteen välisen vakioetäisyyden avulla. Tulkintaohjelma (PUMI) tunnistaa automaattisesti puun rungolle heijastetun lasersäteen ja pisteen ja laskee tämän avulla puun läpimitan. Ohjelma toimii joko täysin automaattisesti, jolloin käyttäjän ei tarvitse kuin avata kuvatiedosto (.jpeg) ja läpimitta näkyy suoraan näytöllä. Jos käyttäjä huomaa kuvasta, että automaattisessa tulkinna on virhettä, voidaan läpimitta hakea kovalta ohjelman avulla joko heti mittauksen yhteydessä maastossa tai jälkikäteen (puoliautomaattinen mittaus).

4.4 Läpimitan mittauksen tarkkuus

Laserkameralla mitattuja läpimitahavaintoja verrattiin mittasaksilta mitattuihin referenssimittauksiin. Harha, keskihajonta ja keskivirhe laskettiin koko aineistolle sekä erikseen männylle, kuuselle, koivulle sekä muille lehtipuille (haapa, leppä, pihlaja).

Laserkameran läpimitan mittauksen virhe (e_{-d}) yksittäiselle puulle määritettiin kaavalla

$$e_{-d} = d_{1,3\text{laser}} - d_{1,3\text{ref}} \quad (1)$$

jossa $d_{1,3\text{ref}}$ on referenssimittauksessa mitattu läpimitta ja $d_{1,3\text{laser}}$ on laserkameralla mitattu läpimitta.

Laserkameralla mitattujen läpimittojen luotavuutta tarkasteltiin laskemalla keskineliövirhe (MSE, mean-square error). Koska oikeat läpimitat oletettiin tunnetuiksi, voidaan keskivirhe jakaa hajonnan ja harhan komponentteihin (Cochran 1977). Läpimitan mittauksen harha ($b[e_{-d}]$) laskettiin kaavalla

$$b[e_{-d}] = e_{-d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{-d_i} \quad (2)$$

ja keskivirhe $s[e_{-d}]$ kaavalla

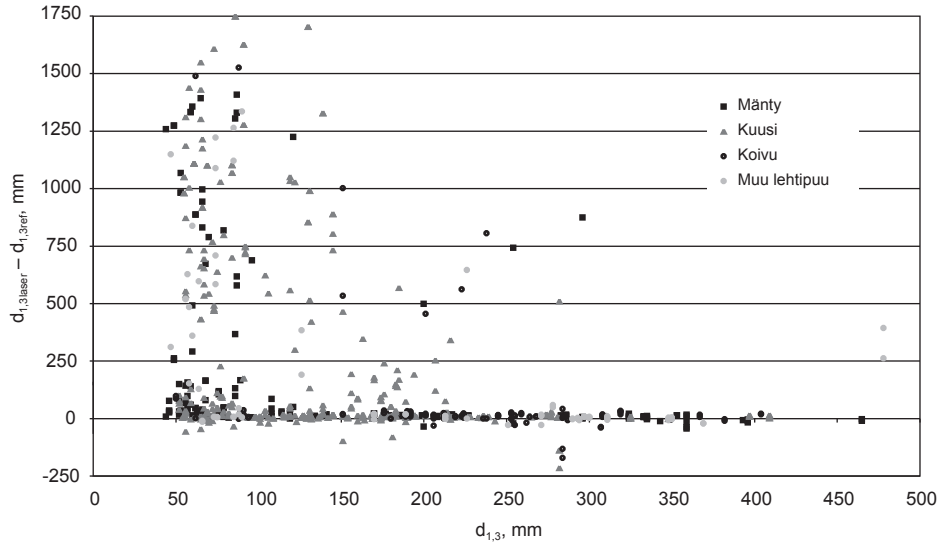
$$s[e_{-d}] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [e_{-d_i} - e_{-d}]^2} \quad (3)$$

jossa n on havaintojen lukumäärä ja i on puukohdainen indeksi. Suhteellinen keskivirhe laskettiin vastaavasti, mutta läpimitan mittauksen virhe (e_{-d}) suhteutettiin referenssiläpimittaan ($d_{1,3\text{ref}}$).

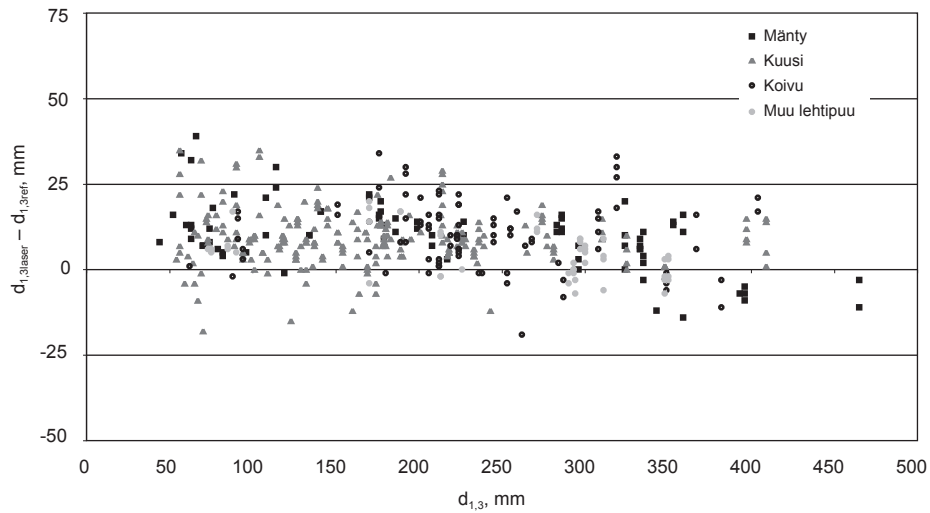
Laskettaessa keskivirhettä eri mittausmenetelmille ja kun mittausvirheet ovat toisistaan riippumattomia, voidaan referenssimittauksessa oleva keskivirhe ottaa huomioon seuraavasti:

$$s[e_{-d}]_{\text{menetelmä}} = \sqrt{s[e_{-d}]^2 - s[e_{-d}]_{\text{ref}}^2} \quad (4)$$

jossa $s[e_{-d}]_{\text{menetelmä}}$ on laserkameran läpimitanmittauksen keskivirhe ilman mittasaksien mittauksen sisältämää virhettä ja $s[e_{-d}]_{\text{ref}}$ on mittasaksilla mitatun läpimitan keskivirhe.



Kuva 6. Laserkameralla ja mittasaksilla mitattujen läpimittojen ero ($d_{1,3,laser} - d_{1,3,ref}$), kun aineistosta ei ole poistettu selkeitä virheellisiä havaintoja (epäonnistuneita mittauksia).



Kuva 7. Laserkameralla ja mittasaksilla mitattujen läpimittojen ero ($d_{1,3,laser} - d_{1,3,ref}$), kun aineistosta on poistettu selkeät virheelliset havainnot.

Koska suhteellinen keskivirhe todettiin olevan selkeästi suurempi pieniläpimittaisilla puilla, osoitettiin aineisto rinnankorkeudelta alle 6,99 cm:n puihin ja yli 6,99 cm:n puihin. Ositus perustui ajatukseen, että pääosa puuston tilavuudesta ja arvosta muodostuu läpimitaltaan yli 7 cm:stä puista, joista ollaan kiinnostuneita myös leimikon ennakkomittauksessa ja maastoinventoinneissa. Suhteellinen keskivirhe laskettiin molemmille ositteille erikseen sekä koko aineistolle.

Selkeät virheelliset havainnot (epäonnistunut mittaus) poistettiin aineistosta. Syynä havainnon poistamiseen oli joko se, että kameran heijastama laserpiste ei ollut osunut runkoon (laserpiste oli joko puun edessä olevissa oksissa tai mennyt kokonaan ohi rungosta) tai läpimitan mittauskorkeus tai suunta ei vastannut referenssimittausta. Havainnon virheellisyys todettiin jälkikäteen mittaustapahtumasta tallentuneesta valokuvasta, josta voidaan havaita puun runko, runkoon osunut tai osumatta jäänyt laserpiste sekä laserviiva. Mittauskorkeus todettiin virheelliseksi, mikäli laserviiva ei ollut rungossa olevan numerolapun tasalla ja mittaussuunta virheelliseksi silloin, kun numerolappu ei ollut kohtisuoraan koelan keskipistettä kohden. Referenssimittauksia ei käytetty hylkäämisperusteena, vaan tulokset laskettiin aineiston tarkastuksen jälkeen. Havaintojen poistaminen ei myöskään vaikuttanut runkolukusarjan muotoon, vaan epäonnistuneet mittaukset jakaantuivat tasaisesti koko runkolukusarjan alueelle.

Tulokset laskettiin sekä puoliautomaattisesti että automaattisesti tulkittujen läpimittahavaintojen perusteella. PUMI -ohjelmassa puun runkoa kuvaavat reunamerkit (puoliautomaattinen tulkinta) siirrettiin vastaamaan puun todellisia ääri viivoja kuvassa, mikäli kuvan jälkikäsitteilyssä havaittiin, että automatiikka ei ollut toiminut. Automaattisessa tulkinnassa hylättiin selvästi virheelliset havainnot ($d_{1,3} - d_{1,3ref} > 10$ cm) sekä havainnot, joissa todettiin, joko laserpisteen osuneen muualle kuin puun runkoon tai mittauskorkeuden tai mittaussuunnan olevan virheellinen. Näistä syistä aiheutuvat mittausvirheet ($4 \text{ cm} < d_{1,3} - d_{1,3ref} < 10$ cm) ovat yleensä mahdollista havaita jo maastossa, jolloin mittaaja voi poistaa virheellisen havainnon ja suorittaa mittauksen uudestaan. Tässä tutkimuksessa vastaavaa tilannetta simuloitiin siten, että valokuvat käytiin läpi maastomittausten jälkeen ennen tulosten lasken-

taa. Lisäksi määritettiin syy, miksi kyseinen mittaus oli epäonnistunut.

4.5 Läpimitan mittauksen tehokkuus

Mittalaitteen suorituskykyä selvitettiin mittaamalla tunnettuja koelajoja erityyppisissä metsiköissä. Laserkameralla koelan mittaukseen kulunut aika kirjattiin ylös minuutin tarkkuudella. Koelamittaus käsitti läpimittojen mittaamisen laserkameralla eli puun runkojen löytämisen, tähtäämisen oikealle korkeudelle, kameran tarkennuksen ja kuvan ottamisen. Varsinainen kuvien tulkinta tehtiin jälkikäteen. Aikatutkimus käsittää koelamittauksen maastossa, ei jälkikäteen tehtävää tulkintaa.

5 Tulokset

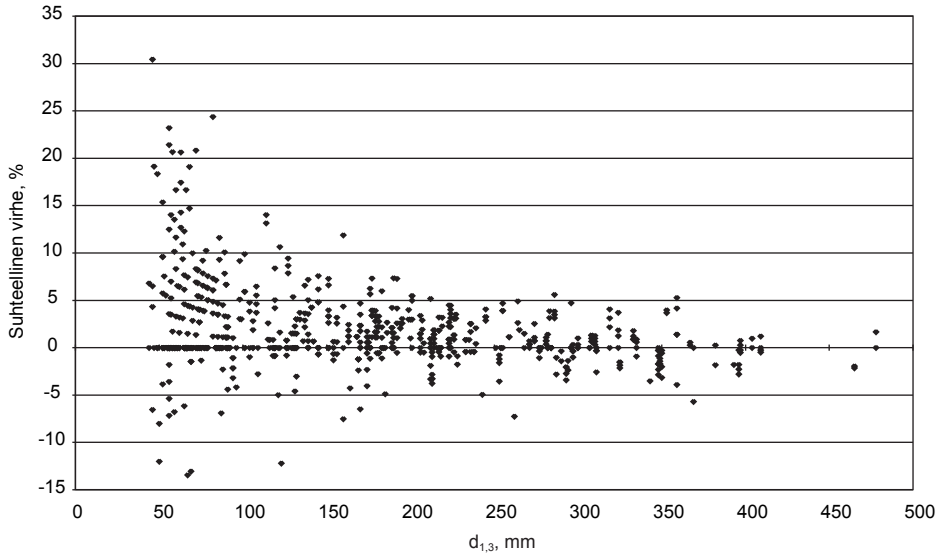
5.1 Läpimitan mittauksen tarkkuus

Läpimitan mittauksen tarkkuus (keskivirhe) käytettäessä puoliautomaattista tulkintaa oli 6 mm (5,3 %). Tästä harhan osuus on 2,5 mm eli laserkameralla saadut tulokset antavat lievän yliarvion (2,3 %) läpimitasta. Suhteellinen keskivirhe oli yli 7 cm paksuilla puilla keskimäärin 4 %, kun taas tätä pienemmillä puilla selkeästi suurempi, keskimäärin lähes 10 %:n luokkaa (kts. kuva 8).

Puulajeittain tarkasteltaessa läpimitan mittaus-tarkkuus (keskivirhe) oli paras kuusella 5,0 mm (4,4 %), sitten koivulla 6,4 mm (3,3 %) ja männyllä 7,6 mm (7,6 %). Muilla lehtipuilla (haapa, pihlaja, leppä) keskivirhe oli 6,1 mm (6,0 %). Harha kaikilla puulajeilla, muita lehtipuita lukuun ottamatta, oli positiivinen. Männyllä harhan todettiin olevan lähes kaksinkertainen verrattuna kuuseen ja koivuun (kts. taulukko 2).

Automaattisella kuvatulkinnalla läpimitan mittaustarkkuus (keskivirhe) koko aineistossa oli 12,7 mm:ä. Puulajeittain tarkasteltaessa automaattinen tulkinta toimi parhaiten kuusella 12,4 mm (%), siten männyllä 14,1 mm (%) ja koivulla 14,3 mm (%) (kts. taulukko 3).

Läpimitan mittauksen onnistumisprosentti puoliautomaattisella tulkinnalla oli noin 80 % kaikilla



Kuva 8. Laserkameralla mitatun läpimittahavainnon ja referenssimittauksen ($d_{1,3\text{laser}} - d_{1,3\text{ref}}$) suhteellinen virhe läpimitan funktiona.

Taulukko 2. Läpimitan mittauksen tarkkuus laserkameralla puoliautomaattisesti tulkittujen läpimittahavaintojen perusteella.

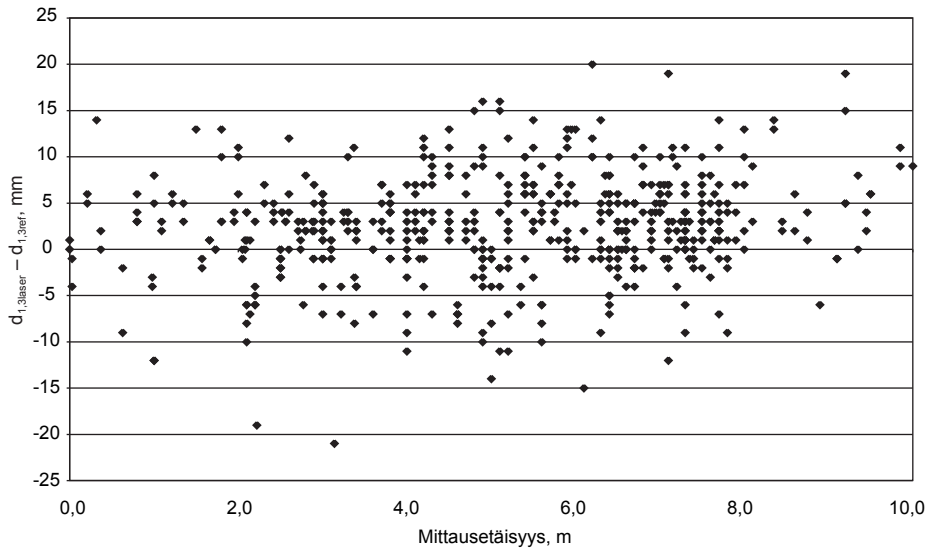
	n	$d_{1,3}$	Harha, mm	Harha, %	Keski-hajonta, mm	Keski-hajonta, %	Keski-virhe, mm	Keski-virhe, %
Mänty	124	17,2	4,6	4,8	6,0	5,8	7,6	7,6
Kuusi	272	16,9	2,2	1,8	4,5	4,0	5,0	4,4
Koivu	88	22,8	2,5	1,0	5,9	3,1	6,4	3,3
Muu lehtipuu ^{a)}	68	21,9	-0,6	1,5	6,1	5,8	6,1	6,0
Koko aineisto	552	18,5	2,5	2,3	5,5	4,8	6,0	5,3

^{a)} Haapa (n=51), pihlaja (n=17), leppä (n=13)

Taulukko 3. Läpimitan mittauksen tarkkuus laserkameralla automaattisesti tulkittujen läpimittahavaintojen perusteella.

	n	$d_{1,3}$	Harha, mm	Harha, %	Keski-hajonta, mm	Keski-hajonta, %	Keski-virhe, mm	Keski-virhe, %
Mänty	79	21,5	10,1	9,0	9,8	12,0	14,1	15,1
Kuusi	224	17,3	9,4	7,0	8,1	9,3	12,4	11,7
Koivu	87	23,6	10,1	4,9	10,2	5,0	14,3	7,0
Muu lehtipuu ^{a)}	49	25,1	4,7	3,0	7,0	4,4	8,5	5,4
Koko aineisto	439	20,2	8,8	6,1	9,2	8,4	12,7	10,4

^{a)} Haapa (n=51), pihlaja (n=17), leppä (n=13)



Kuva 9. Mittausetäisyyden vaikutus läpimitan mittaustarkkuuteen.

Taulukko 4. Mittausten onnistumisprosentti puulajeittain sekä koko aineistossa.

	Automaattinen	Puoliautomaattinen
Mänty	51,6	81,0
Kuusi	58,0	70,5
Koivu	80,6	81,5
Muu lehtipuu	60,5	84,0
Koko aineisto	57,4	75,8

muilla puulajeilla paitsi kuusella, jolla onnistumisprosentti oli 70. Puoliautomaattisella kuvatulkinnalla läpimitan mittaus onnistuu selkeästi, noin 20 prosenttiyksikköä paremmin, kuin automaattista tulkintaa käytettäessä.

Käytettäessä pelkkää automatiikkaan perustuvaa mittausta saadaan läpimita noin 60 %:lle havainnoista keskivirheen ollessa 12,7 mm. Menetelmä vaatii siis läpimittojen tarkistamisen PUMI-ohjelman avulla (puoliautomaattinen mittaus), jotta saatavien tulosten tarkkuus on kilpailukykyinen perinteisten läpimitan mittausmenetelmien kanssa.

Mittausetäisyyden vaikutuksesta mittaustarkkuuteen ei voida tämän aineiston perusteella vetää yksiselitteisiä johtopäätöksiä. Aineiston perusteella

näyttää siltä, että lyhyillä etäisyyksillä (< 10 m), mittausetäisyydellä ei olisi vaikutusta mittaustarkkuuteen ($R^2=0,0294$). Mittalaitteen optimaalinen toimintaetäisyys on 2–15 metriä. Mittausetäisyydellä todettiin kuitenkin olevan vaikutusta mittauksen onnistumiseen eli mitä kauempana puu on, sitä vaikeampi on kohdistaa laserviiva ja piste puun runkoon. Puita jää myös enemmän katveeseen, mikäli mittausetäisyys kasvaa kovin suureksi.

5.2 Läpimitan mittauksen tehokkuus

Koelan mittaukseen kulunut aika oli keskimäärin 7,5 min, silloin kun koelalla on keskimäärin 22 puuta. Yhden puun läpimitan mittaamiseen kulunut aika oli keskimäärin kymmenen sekuntia. Mittausaika käsitti puun rinnankorkeuden havaitsemisen, kameran objektiivin tarkentamisen ja valokuvan ottamisen. Tulokset eivät sisällä mittaustuloksen tarkistamista maastossa, vaan tulokset on tarkistettu jälkikäteen.

Taulukko 5. Koealan mittaukseen kulunut aika minuuteissa (min), sekä sen perusteella laskettu keskimääräinen yhden puun mittaukseen kulunut aika. Yhdellä mittaukskerralla koealojen puista otettiin kaksi mittausta, jolloin havaintojen määrä oli kaksi kertaa koealalla olevien puiden lukumäärä (rl).

Koeala	rl/koeala, kpl	Mittaukseen kulunut aika/koeala, min		Mittaukseen kulunut aika/puu, min	
		I mittaus	II mittaus	I mittaus	II mittaus
1	27	8:00		00:09	
2	32	17:00		00:16	
3	23	12:00		00:16	
4	5	2:00	1:00	00:12	00:06
5	21	8:00	9:00	00:11	00:13
6	27	9:00	8:00	00:10	00:09
7	23	11:00	5:00	00:14	00:07
8	13	5:00	5:00	00:12	00:12
9	32	8:00	6:00	00:07	00:06
10	22	4:00	6:00	00:05	00:08
Keskiarvo	21,6	8:24	5:43	00:11	00:09
I ja II mittauksen keskiarvo		7:18		00:10	

6 Tulosten tarkastelu

Koealat sijaitsivat joko luonnonsuojelualueella (Nuuksio) tai virkistyskäyttöön (Espoonlahti) tarkoitetuilla alueilla, mistä johtuen koealojen puustot olivat vaihtelevampia niin puulajisuhteiltaan kuin läpimittajakaumiltaan kuin vastaavat talousmetsät. Tätä voidaan pitää toisaalta tämän tutkimuksen etuna, mutta toisaalta se saattaa vaikuttaa tuloksia huonontavasti, koska näkyvyys käsitellyssä talousmetsässä on useammassa tapauksissa parempi kuin tutkimusaineiston koealoilla.

Tästä osittain johtuneen automaattisen kuvatulkinnan matalahko onnistumisprosentti (60 %). Varsinkin männyllä ja kuusella automaattinen kuvatulkinna vaatii kuvien tarkastamisen PUMI-ohjelmassa. Männyllä kuvien jälkikäsitteily nostaa onnistumisprosentin 80:een eli vastaavalle tasolle kuin lehti-puilla. Kuusella puolestaan ei puoliautomaattisella kuvatulkinalla päästä kuin 70 % tasolle, mikä johtuneen kuusen alaoksisen runsaudesta.

Mikäli laitteeseen kytketään kulma-anturi, edellä mainittu ongelma poistuu osittain, koska tällöin läpimitan mittauksessa ei olla enää sidottuja rinnankorkeuteen, vaan rungon läpimitta voidaan mitata joltain muulta korkeudelta ja palauttaa laskennallisesti

runkokäyrien avulla rinnankorkeudelle (Laasasenaho 1982). Tällöin läpimitta saadaan estimoitua valtaosalle puista. Käytettäessä useampia toistomittauksia (1–4/puu) ja valitsemalla mittaustuloksista ensimmäinen onnistunut mittaus, saatiin läpimitan estimaatti 91 %:lle puista. Kulma-anturin liittäminen laitteeseen mahdollistaa myös puun piteuden sekä erilaisten laatua kuvaavien tunnusten, kuten elävän latvuksen piteuden ja kuivaoksarajan määrittämisen.

Yleisimmät virhelähteet mittaustuloksissa aiheutuvat joko siitä, että kameran heijastama laserpiste ei osu runkoon tai rungon edessä on näkyvyyttä haittaavia oksia. Tarkempaa virhetarkastelua varten virhelähteet luokiteltiin kolmeen ryhmään: 1) virheisiin, jotka aiheutuvat siitä, että laserpiste tai -viiva ei osu runkoon, jolloin laskenta-algoritmi ei toimi tai kuva on niin epätarkka (zoomaus), että läpimitan määrittäminen ei onnistu, 2) oksien aiheuttamiin virheellisiin mittaustuloksiin sekä 3) virhelähteisiin, jotka aiheutuivat mm. mittauskorkeudesta ja mittaussuunnasta (kuva 10). Selkeitä virheellisiä mittauksia, jotka jouduttiin hylkäämään, oli puoliautomaattisessa kuvatulkinna 24 % ja automaattisessa kuvatulkinna 44 %. Hylätyistä havainnoista pääosa, noin 86 %, johtui siitä, että laserpiste ei ollut osunut runkoon (1) tai mitattavan rungon edessä oli mittausta haittaavia oksia (2). Loput 14 % aiheutui muista virhelähteistä (3).



Kuva 10. Laserkameran tyypillisimmät virhelähteet: 1) kameran laskenta-algoritmi ei ole toiminut, koska laserpiste ei ole osunut runkoon 2) puun rungon edessä on oksia, jolloin laserviivan ja pisteen kohdistaminen runkoon ei onnistu 3) mittauskorkeus tai mittausuunta on määritetty väärin 4) voimakas auringon valo on aiheuttanut laserviivan katkeamisen.

Esteettömissä olosuhteissa laserkamera mittaa tarkasti, mutta mikäli näkyvyys on huono (puusto erittäin tiheää ja oksikasta), laserpiste ei osu runkoon, vaan oksiiin tai menee ohi rungosta, kameran laskenta-algoritmi ei toimi ja mittaus epäonnistuu. Tämä selittää varsinkin kuusella sekä pieni läpimitaisilla puilla mittausten suhteellisen pientä onnistumisprosenttia. Alle 7 cm:n paksuisia puita koko aineistossa oli 9 %.

Myös valaistusolot vaikuttavat läpimitan mittauksen onnistumiseen. Esimerkiksi voimakas auringon paiste haittaa läpimitan mittausta, koska rungolle heijastettu lasersäde ei erotu selvästi eikä laskenta-algoritmi tunnista viivaa. Tällaiset tapaukset on helppo korjata PUMI-ohjelmassa. Tutkimusaineistossa em. tapauksia oli vain muutama. Automaattikan kannalta pimeä kuva olisi puolestaan optimaalinen. Tällöin laserviiva ja piste erottuvat selkeästi

ja automaattinen algoritmi toimii. Toisaalta tällöin jälkikäsitteily on hankalampaa kuvan tummuuden takia. Mikäli puu kasvaa vinossa, tulee valokuva kohdistaa puun runkoon nähden kohtisuoraan, jolloin puun vinoudesta aiheutuvaa mittausvirhettä ei pääse syntymään.

Tarkasteltaessa mittaustarkkuutta puulajeittain on otettava huomioon tutkimusaineistossa olevat erot läpimitan keskiarvon ja hajonnan suhteen eri puulajeilla. Kuusella sekä läpimitan keskiarvo, että hajonta ovat pienempiä kuin aineistossa keskimäärin. Koivut ovat puolestaan keskimääräistä suurempia, männyn jakaantuessa tasaisemmin koko läpimitajakauman alueelle. Varsinkin kuusen pieni hajonta ja läpimitajakauman painottuminen pieniläpimitaisiin runkoihin voi antaa huonomman kuvan mittaustarkkuudesta kuin se todellisuudessa on. Varsinkin nuorille kuusille on tyypillistä runsas alaoksisto,

mikä vaikuttaa mittauksen onnistumiseen. Kuusella ei tapahdu myöskään niin voimakasta kaarنوittumista, kuin männyllä ja koivulla, mikä voisi heikentää mittaustarkkuutta ikääntyneissä puustoissa. Koivun ja männyn osalta mittaustuloksiin heikentävästi vaikuttaa kaarna, mikä varsinkin automaattisessa kuvatuokinnassa saattaa tuottaa ongelmia.

Vertailtaessa läpimitan mittaustarkkuutta aikaisempiin perinteisillä menetelmillä saatuihin tutkimustuloksiin voidaan todeta, että laserkameralla saavutetaan vähintäänkin vastaava mittaustarkkuus. Perinteisillä mittasaksilla läpimitan mittauksen mittausrvirheiden keskihajonnan on todettu vaihtelevan 2,7 mm:n ja 6,9 mm:n välillä (Hyppönen ja Roiko-Jokela 1978, Päivinen ym. 1992). Puun epäpyöreystä (mittaussuunta) aiheutuvaa virhettä laserkameralla ei pystytä eliminoimaan, mutta mittausrkorkeudesta aiheutuvaa virhettä on mahdollista pienentää, mikäli laitteeseen on liitetty kulma-anturi, jonka avulla mittausrkorkeus voidaan määrittää.

Vertailtaessa laserkameran tehokkuutta muualla kehitettyihin lasertekniikkaan perustuviin mitta-laitteisiin ovat saadut tulokset selkeästi parempia. Williams ym. (1999) ovat saaneet yläläpimitan keskihajonnaksi 8,8–14,3 mm:ä, kun taas Varjon ym. (2006) tutkimuksessa läpimitan mittaustarkkuus vaihteli 7,0–9,4 mm:n välillä mittausrkorkeudesta ja puun koosta riippuen. Varjon ym. (2006) tutkimuksessa käytettiin kameraa, jonka kennon resoluutio oli 0,5 megapikseli, kun taas tässä tutkimuksessa käytetyn kameran kennon resoluutio oli 10 megapikselin luokkaa. Tämä viitannee siihen, että nykyisten digitaalikameroiden resoluutiolla ei näytä olevan kovin suurta vaikutusta mittaustulokseen.

Tulosten tarkastelussa on otettava huomioon, että myös referenssimittauksiin eli perinteisten mittasaksien käyttöön liittyy tietty virhemarginaali, joka tulisi ottaa huomioon mittaustarkkuutta arvioitaessa. Tässä tutkimuksessa referenssimittausta eli mittasaksilla mitattua tulosta on pidetty ”oikeana”. Mikäli mittasaksimittauksiin sisältyvä virhe otetaan huomioon laskelmissa, saadaan laserkameran (puoliautomaattinen) keskivirheeksi koko aineistolla 5,4 mm, männyllä 7,1 mm, kuusella 4,2 mm ja koivulla 5,8 mm. Tarkastelussa käytettiin oletuksena, että mittasaksien keskivirhe on 2,7 mm (Hyppönen ja Roiko-Jokela 1978).

Pienellä jatkokehityksellä laserkamera toimii luotettavasti myös vaikeissa kohteissa. Se edellyt-

tää lähinnä kulma-anturin liittämistä laitteeseen, jolloin läpimita voidaan mitata miltä tahansa rungon korkeudelta, jossa näkyvyys on parempi. Myös laserkameran parametrien säädöllä paremmin maasto-olosuhteisiin soveltuvaiksi voidaan parantaa mittausten onnistumista. Tavoiteltavaa olisi myös se, että laserkameralla mitatun läpimitan tarkastaminen ja reunamerkkien asettaminen vastaamaan rungon ääri viivoja (puoliautomaattinen korjaus) olisi mahdollista jo maastossa suoraan kameran näytöltä. Käyttöliittymän kautta voisi samassa yhteydessä tallentaa myös puulajitiedot sekä mahdollisesti muita kuviotason tietoja, kuten metsätyyppin, ojitustilan-teen jne. Mikäli automaattisessa puulajitunnistuksessa (Kosonen 2007) saavutetaan tulevaisuudessa luotettavampia tuloksia, voisi olla tarpeen selvittää menetelmien yhdistämismahdollisuudet.

7 Johtopäätökset

Läpimitan mittaaminen onnistuu laserkameralla varsin luotettavasti ja mittaaminen laitteella on nopeaa (10 s/puu) ja tehokasta. Etuna voidaan myös pitää sitä, että mittauksesta jää aina dokumentti, johon voidaan palata, mikäli mittaustuloksessa havaitaan jotain poikkeavaa. Tulevaisuudessa läpimittoja voidaan mitata rungon eri korkeuksilta, joka mahdollistaa koealamittauksessa useamman läpimitan käytön esimerkiksi puun tilavuuden laskennassa. Tällöin runkokäyrillä tai tilavuusyhtälöillä saatava tilavuus-estimaatti paranee 5–8 prosentilla (Laasasenaho 1982, Varjo ym. 2006). Kaiken kaikkiaan laserkamera on varsin lupaava mittalaite rungon läpimitan mittaamiseen. Liittämällä laitteeseen kulma-anturi, laseretäisyysmittari, elektroninen kompassi sekä GPS -vastaanotin mahdollistaa se puun pituden, sijainnin sekä laatutunnusten mittaamisen koealalla.

Kiitokset

Laserkamera on kehitetty Mittatekniikan keskuksessa, osana Mittatekniikan keskuksen, Teknillisen korkeakoulun, Helsingin yliopiston sekä Masser Oy:n puuston mittauksen yhteishanketta, jonka koordinoinnista on

vastannut Metsäteho Oy. Mittalaitteen kokoaminen on tehty MIKESin ja Masser Oy:n yhteistyönä ja mittalaitteen testauksesta on vastannut Metsävarojen käytön laitos, Helsingin yliopistosta. Hanketta ovat rahoittaneet myös Metsäteho Oy ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Maastotestaus on tehty Metsämiesten säätiön ja Suomen Akatemian varoin. Prof. Erkki Ikonen Teknillisestä korkeakoulusta on aktiivisesti kehittänyt laserviivaan perustuvan läpimitan mittauksen teknisiä ratkaisuja sekä edistänyt hanketta mm. Maija Ojasen ja Jani Kivilähteen diplomitöiden kautta. Myös prof. Annika Kangas on antanut arvokkaita kommentteja käsikirjoitukseen. Haluamme kiittää kaikkia edellä mainittuja tahoja hankkeen toteutumisesta sekä ennen kaikkea emeritusprof. Jouko Laasasenaho, joka on useiden vuosien ajan edistänyt ja ideoinut uuden sukupolven metsänmittaukseen soveltuvan mittalaitteen kehittämistä.

Kirjallisuus

- Carr, B. 1992. Using laser technology for forestry and engineering applications. *Compiler* 10: 5–16.
- 1996. Using Criterion 400 and Impulse 200 laser instruments to accurately measure trees. *Compiler* 14: 6–12.
- Clark, N., Zarnoch, S., Clark III, A. & Reams, G. 2001. Comparison of standing volume estimates using optical dendrometers. *Julkaisussa: Reams, G., MacRoberts, R. & Van Deusen, P. (toim.). Proceedings of the second annual forest inventory and analysis symposium (FIA). 17–18.10.2000; Salt Lake City, UT. General Technical Report SRS-47. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC. s. 123–128.*
- Cochran, W.G. 1977. *Sampling techniques*. Third ed. Wiley.
- Forsman, P. & Halme, A. 3-D. 2005. Mapping of natural environments with trees by means of mobile perception. *IEEE Transactions on Robotics* 20(3) : 482–490.
- Henning, J.G. & Radtke, P.J. 2006. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science* 52(1) : 67–80.
- Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Doctoral dissertation. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. *Silvestria* 278. SLU, Umeå, Sweden. 43 s.
- Hopkinson C., Chasmer, L., Young-Pow, C., & Treitz, P. 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 573–583.
- Hyppönen, M. & Roiko-Jokela, P. 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. Summary: On the accuracy and effectivity of measuring sample trees. *Folia Forestalia* 356. 25 s.
- Hyypä, H. & Hyypä, J. 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 5–15.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- , Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X., & Maltamo, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1339–1366.
- , Mielonen, T., Hyypä, H., Maltamo, M., Yu, X., Honkavaara, E. & Kaartinen, H. 2005. Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. *Julkaisussa: Proceedings of ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, September 12–14, 2005, Enschede, Netherlands, (Netherlands: GITC bv), XXXVI, Part 3/W19. s. 144–149.*
- , Yu, X., Hyypä, H. & Maltamo, M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. *EARSel SIG Forestry. Julkaisussa: International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, Proceedings, Vienna, 14–15 Feb. 2006. s. 63–78.*
- Jutila, J., Kannas, K. & Visala, A. 2007. Tree measurement in forest by 2D laser scanning. *Julkaisussa: International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA, Jacksonville, FL, 2007. s. 491–496.*
- Juujärvi, J., Heikkinen, J., Brant, S. & Lampinen, J. 1998. Digital image based tree measurement for forest inventory. *Julkaisussa: Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering: intelligent robots and computer vision XVII: Algorithms, techniques and active vision, Boston USA, November 2–4, volume 3522. s. 114–123.*
- Kalliovirta, J., Laasasenaho, J. & Kangas, A. 2005. Eval-

- uation of the Lase-relascope. *Forest Ecology and Management* 204 : 181–194.
- Kivilähde, J. 2008. Kehitysympäristö puustotunnusten mittaukseen kuvankäsittelytekniikoilla. Abstract: Mobile development environment for image-based measurements of tree attributes. Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, Mittaustekniikka. MIKES. Diplomityö. 89 + 16 s.
- Korpela I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica Monographs* 3. 93 s.
- , Dahlin, B., Schäfer, H., Bruun E., Haapaniemi, F., Honkasalo, J., Ilvesniemi, S., Kuutti, S., Linkosalmi, M., Mustonen, J., Salo, M., Suomi, O. & Virtanen, H. 2007a. Single-tree forest inventory using LiDAR and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. *IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007*. s. 227–233.
- , Tuomola, T. & Välimäki, E. 2007b. Mapping forest plots: an efficient method combining photogrammetry and field triangulation. *Silva Fennica* 41(3): 457–469.
- Kosonen, S. 2007. Tree species recognition with machine vision using color and texture analysis. Tiivistelmä: Puulajien tunnistaminen konenäöllä värin ja tekstuurin avulla. Teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto. Diplomityö. 12 + 96 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- , Koivuniemi, J., Melkas, T. & Rätty, M. 2002. Puuston mittausta etäisyyden- ja kulmanmittauslaitteella. *Metsätieteen aikakauskirja* 2002 (3): 493–497.
- Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 134. 69 s.
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- Miettinen, M., Öhman, M., Visala, A. & Forsman, P. 2007. Simultaneous Localization and Mapping for Forest Harvesters. *Julkaisussa: IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Rome, Italy, 10–14 April 2007*. s. 517–522.
- Naesset, E. 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49–56.
- 1997b. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246–253.
- 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80: 88–99.
- 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- Ojanen, M. 2005. Puun halkaisijan mittaaminen kuvankäsittelytekniikoin. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Diplomityö. 76 s.
- Parker, P.C. & Matney, T.G. 1999. Comparison of optical dendrometers for prediction of standing tree volume. *Southern Journal of Applied Forestry* 23 (2):100–107.
- Päivinen, R., Nousiainen, M. & Korhonen, K. T. 1992. Puustotunnusten mittaamisen luotettavuus. *Folia Forestalia* 787. 18 s.
- Skovgaard, J.P., Johannsen, V.K. & Vanclay, J.K. 1998. Accuracy and precision of two dendrometers. *Forestry* 71(2) : 131–139.
- Suomela, T. 2005. Puulajin tunnistus rungon värin ja tekstuurin perusteella. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Mittaus- ja informaatiotekniikan laitos. 124 s.
- Varjo, J., Henttonen, H., Lappi, J., Heikkonen, J. & Juujärvi, J. 2006. Digital horizontal tree measurements for forest inventory. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 40. 23 s. ISBN-13: 978-951-40-2026-1 (PDF), ISBN-10: 951-40-2026-X (PDF). Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp040.htm>.
- Watt, P.J. & Donoghue, D.N.M. 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 26(7): 1437–1446.
- Williams, M., Cormier, K., Briggs, R. & Martinez, D. 1999. Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 laser dendrometers for measuring upper diameters and heights. *Forest Science* 45(1) 53–61.
- Österberg, P. & Ihalainen, H. 2006. Puun laatutiedon mittaaminen kuvasta. *Metsätehon raportti* 197. 21 s.